

2fa5-40e6-b067-4492c5ab22&print=1. (Chernous'ko F.L. Bolotnik N.N. and Gradetskii V.G.)

5. Polishchuk M.N. Modernization of the vacuum gripper of the mobile walking robot. *Mechanics and Advanced Technologies*, vol. 2 (80), 2017, p. 59–64.

6. Kuznjecov Ju.M., Shybecjkyj V.Ju. Robotic systems complexes of pharmaceutical and biotechnological productions. Kiev, GhNOZIS, 2012, 335 p.

7. Pavlenko I.I. Industrial work: calculation basics and design. KNTU. Kirovograd, 2007, 420p.

8. Sinev A.V., Gradetskii V.G., Kravchuk L.N. The vehicle for moving along the surfaces arbitrarily oriented in space. State Register of Patents of Russia, Pat. № 2262461, 2005, 6p.

9. Baranov V. E. Vehicle for moving on inclined and vertical surfaces. State Register of Patents of Russia Pat. № 2267434, 2006, 8p. (Baranov V. E., Vagin S.G., Zatsepin V. A., Kokorin A. G.)

10. Chashchukhin V.G. Investigation of the movement parameters of a robot with a sliding seal. – *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*, vol 4 (2), 2011, pp. 347–349.

11. Shamim Hasan. Smartphone Controlled Spy Robot with Video Transmission and Object Collector, *International Journal of Engineering and Manufacturing (IJEM)*, Vol.7, No.6, 2017, p.50-58. (Shamim Hasan, Khalid Hossain Jewel, Niaz Mostakim, Nabil Hossain Bhuiyan, M.K. Rahman, Sheikh Dobir Hossain and Khalid Hossain).

12. Tin Lun Lam., Yangsheng Xu Tree Climbing Robot: Design, Kinematics and Motion Planning. New York: Springer Heidelberg. 2012, p. 37–46.

13. Yehya M., Wasim A., Jahanzaib M., Abdalla H. A. Unipolar Electroadhesion Pad Technology for Adhesion Mechanism of Wall Climbing Robot. *International Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 2 (1), 2014, p. 1–10.

14. Yampolskiy L.S. Method and device for movement of pedipulators of walking robot. State Register of Patents of Ukraine, Pat. 111021, 2016, 11p. (Yampolskiy L.S., Polishchuk M.N., Persikov V. K.).

15. Polishchuk M., Oliinyk V. Mobile climbing robot with elastic energy accumulators. *Mechanics and Advanced Technologies*, vol. 1 (82), 2018, p. 116 – 122.

16. Kuznetsov Yu.M., Polishchuk M.M. Walking mobile robot Kuznetsova – Polishchuka. Ukrainian Institute of Intellectual Property, Ukraine, application for a patent № a2018079762018, 16p.

17. Polishchuk M., Opashnianskyi M., Suyazov N. Walking Mobile Robot of Arbitrary Orientation, *International Journal of Engineering and Manufacturing (IJEM)*, vol.8, No.3, 2018, pp.1–11.

18. Polishchuk M.N. Antigravity mobile robot Polishchuk. Ukrainian Institute of Intellectual Property, application for a patent № a201805661, 2018, p. 8–10.

MATHEMATICAL MODELS IDENTIFICATION IN CHARACTERISTIC SITUATIONS OF CONDUCT OF THE BREWERY TECHNOLOGICAL COMPLEX

Romanov N.

PhD, National University of Food Technologies, Kiev

Svitoch I.

PhD student, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kiev

Macebula D.

PhD student National University of Food Technologies, Kiev

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В ХАРАКТЕРНЫХ СИТУАЦИЯХ ПОВЕДЕНИЯ КОМПЛЕКСА ПИВЗАВОДА

Романов Н.

Кандидат технических наук, старший преподаватель, Национальный университет пищевых технологий, г. Киев

Свиточ И.

Аспирант, Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорського, г. Киев

Мацебула Д.

Аспирант, Национальный университет пищевых технологий, г. Киев

Abstract

Goal. The purpose is to create mathematical models that allow to describe such basic qualitative characteristics of brewing process as quality of production at all stages of the production process, productivity and losses.

Method. To pass the passive experiment in the production conditions of the brewery according to the results of which (data of measurements of technological parameters and data of laboratory analyzes) to carry out the identification of mathematical models. In the Matlab, using the least squares method, evaluate the competitive models of certain structures and the parameters of these models based on the criteria: determination, Akaike information criterion, Hawking and Fisher statistics.

Results. The use of the above criteria of adequacy allowed us to select the optimal model structures for each situational-significant area in terms of their accuracy and complexity.

Scientific novelty. On the basis of the conducted research, models were developed describing the dependencies of the output process variables, which were the main qualitative indicators that can be quickly measured by objective methods and definitely characterize the quality of semi-finished products and finished products (malt extraction, concentration of hopped wort, stage of fermentation), equipment productivity, specific losses of resources at each stage of production depending on the regime parameters and input products. Models were determined with fuzzy values of input variables.

Practical significance. The created models can be used to create new or to improve the existing systems of automation of brewing processes.

Аннотация

Цель. Цель работы заключается в создании математических моделей, позволяющих описать следующие основные качественные характеристики процесса пивоварения как качество продукции на всех стадиях производственного процесса, производительность и потери.

Методика. Провести пассивный эксперимент в производственных условиях пивзавода по результатам которого (данные измерений технологических параметров и данные лабораторных анализов) осуществить идентификацию математических моделей. В среде Matlab методом наименьших квадратов, оценить модели-конкуренты определенных структур и параметры этих моделей на основе критериев: детерминации, информационного критерия Акаике, статистик Хокинга и Фишера.

Результаты. Использование приведенных критериев адекватности позволило осуществить выбор оптимальных структур моделей для каждой ситуационно-значимой зоны с точки зрения их точности и сложности.

Научная новизна. На основании проведенных исследований созданы модели, описывающие зависимости выходных переменных процесса, которыми были основные качественные показатели, которые могут оперативно измеряться объективными методами и изначально характеризовать качество полуфабрикатов и готовой продукции (экстрактивность солода, концентрация охмеленного сула, степень сбраживания), производительность оборудования, удельные потери ресурсов на каждой стадии производства в зависимости от режимных параметров и входной продукции. Модели определялись при нечетких значениях входных переменных.

Практическая значимость. Созданные модели могут быть использованы для создания новых или совершенствования существующих систем автоматизации технологических процессов пивоварения.

Keywords: brewing, fuzzy values of variables, identification of mathematical models, situational-significant zones.

Ключевые слова: пивоварение, нечеткие значения переменных, идентификация математических моделей, ситуационно-значимые зоны.

Пивоваренная промышленность является одной из ведущих отраслей пищевой промышленности Украины. Основными направлениями повышения эффективности пивоваренного производства являются: улучшение качества продукции, повышение производительности технологического оборудования и рациональное использование энергетических и материальных ресурсов. Технологические процессы в пивоварении характеризуются, как правило, большой сложностью и разнообразием. Общей характерной чертой всех существующих технологических процессов является то, что для преобразований исходного сырья, материала или полуфабриката в определенный конечный продукт, необходимо большое количество функционально отличных степеней переработки.

Для целенаправленного течения этих процессов на отдельных ступенях или на их конкретных стадиях необходимы различные виды энергии, вспомогательных веществ и информации. Условия и режимы реализации отдельных стадий технологических процессов могут также значительно отличаться (щелочные, кислотные, маслянистые и другие среды; высокие температуры или низкие, высокое давление и вакуум; статическая нагрузка или вибрация; мощные электромагнитные поля и т.д.) [1].

Несмотря на большое качественное и количественное разнообразие отдельных технологических процессов, их различные масштабы, режимы и условия реализации, все они имеют общие свойства: они структурно сложны, состоят из отдельных частей или элементов; перерабатывают вещество, энергию или информацию; связаны с другими технологическими или сопутствующими процессами.

Анализ работ по технологии и автоматизации пивоваренных производств показал, что созданы необходимые технологические условия для обеспечения эффективного автоматизированного управления производственными процессами пивоварения. Среди таких работ можно выделить работы ученых В. Кунце, Л. Нарцисса, В.А. Домарецкого. В области автоматизации производственных процессов неопределимым вкладом являются работы ученых: П. Телиса, Л.Третяк, Е. Егорова. Сетевый подход в области управления развит в работах С.А. Юдицкого, Ю.С. Затуливетра, С.А. Куджа [2,3]. Использование сценарного подхода при управлении сложными объектами обосновано в работах В.В. Кульбы, С.А. Косяченко, Д.А.Кононова [4]. Обобщая, можно отметить, что отсутствует комплексный подход к проблемам автоматизированного управления технологическим комплексом пивзавода в целом. На основе

анализа принципов управления сложными технологическими комплексами и достижений современной теории и практики автоматизированного управления определены актуальные проблемы систем управления пивзаводом.

Необходимость планирования на предприятии в условиях высокой изменчивости окружающей среды связана с неопределенностью, риском, а значит и с появлением проблемных ситуаций на предприятии. Причиной появления проблемных или кризисных ситуаций может быть не только объект, но и субъект управления.

Возникновение различных ситуаций, опасных для производства и в целом для предприятия, объективно характеризуется большим количеством взаимосвязанных факторов, повышающих сложность управления. Практика показывает, что проблемные ситуации возникают и протекают по-разному. Ни одна производственная система не функционирует в вакууме, ее окружает очень разнородная среда. Все, что находится вне предприятия, в той или иной степени постоянно влияет на него. Это влияние протекает во времени неравномерно или периодически с разной силой и проявляется неодинаково. Предприятие должно хорошо знать не только среду, в которой находится, но и уметь адекватно реагировать на каждое из внешних воздействий.

Для получения математических моделей для оценки критериев оптимальности в ситуационно-значимых зонах в производственных условиях пивзавода ПАО «Оболонь» был проведен пассивный эксперимент, в ходе которого осуществлялась, с интервалом обеспечения статистическую независимость измерений, фиксация контролируемых переменных, характеризующих технологические процессы приготовления пива (общее количество переменных 31).

По результатам эксперимента (данные измерений технологических параметров и данные лабораторных анализов) осуществлялась идентификация математических моделей методом наименьших квадратов в среде Matlab, где оценивались модели-конкуренты определенных структур и параметры этих моделей на основе критериев: детерминации, информационного критерия Акаике, статистик Хокинга и Фишера. Использование приведенных критериев адекватности позволило осуществить выбор оптимальных структур моделей для каждой ситуационно-значимой зоны с точки зрения их точности и сложности.

Модели описывали зависимости выходных переменных процесса, коими были основные качественные показатели, которые могут оперативно измеряться объективными методами и изначально характеризовать качество полуфабрикатов и готовой продукции (экстрактивность солода E , концентрация охмеленного сула $C_{охм}$, степень сбраживания $S_{збр}$), производительность оборудования, удельные потери ресурсов на каждой стадии производства от режимных параметров и входной

продукции. Модели определялись при нечетких значениях входных переменных.

Обработка экспериментальных данных осуществлялась методом наименьших квадратов, который позволяет по экспериментальным данным подобрать такую аналитическую функцию, которая подходит настолько близко к экспериментальным точкам, насколько это возможно [5].

Идея метода наименьших квадратов заключается в том, что функцию:

$$Y = f(x, a_0, a_1, \dots, a_k) \quad (1)$$

необходимо подобрать таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений измеренных значений y_i от расчетных Y_i была наименьшей:

$$S = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i, a_0, a_1, \dots, a_k)]^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

Задача сводится к определению коэффициентов a_i из условия (2). Для ее решения необходимо составить систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial a_0} &= 0, \\ \frac{\partial S}{\partial a_1} &= 0, \\ &\dots \\ \frac{\partial S}{\partial a_k} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Дальнейший расчет выполняется на основе алгоритма вычисления среднеквадратичного отклонения, а также других критериев.

При постановке задачи предполагается, что структура математической модели известна, по теоретическим основам и основным гипотезам о механизмах явлений, которые происходят в технологических процессах пивоваренной промышленности [6,7].

Метод наименьших квадратов реализован с помощью программного средства Matlab Optimization Toolbox. В зависимости от того как параметры входят в аналитическую зависимость (4), мы получаем или линейную, или нелинейную функцию.

Полином имеет следующий вид:

$$Y = AX_1^2 + BX_2^2 + CX_1X_2 + DX_1 + EX_2 + F \quad (4)$$

де A, B, C, D, E, F – искомые коэффициенты полинома.

В качестве примера, рассмотрим построение модели для некоторых основных контролируемых переменных процессов пивоварения.

Модель качественного показателя процесса получения товарного солода.

Данная модель соответствует области изменения параметра нечеткого понятия "Экстрактивность" "высокая". При этом, число Кольбаха "высокое", содержание редуцирующих сахаров "норма", время осахаривания "норма" влагосодержание солода "норма", содержание азотистых веществ "норма", температура сушения "высокая". Получили поленом следующего вида:

$$\begin{aligned}
E(K, C_{ред}, \tau_{оц}, t_{суш}, W_{сол}) = & 0,629K + 0,040083C_{ред} + 0,2004417\tau_{оц} + 0,675639t_{суш} + \\
& + 0,040861W_{сол} - 0,01366K^2 - 0,00174KC_{ред} - 0,0087K\tau_{оц} - 0,00055C_{ред}\tau_{оц} - \\
& - 0,00138\tau_{оц}^2 - 0,0000556C_{ред}^2 + 0,4249Kt_{суш} + 0,0257KW_{сол} + 0,02708C_{ред}t_{суш} + \\
& + 0,00163C_{ред}W_{сол} + 0,1354t_{суш}W_{сол} + 0,00819\tau_{оц}W_{сол} - 0,00156t_{суш}^2 - 0,0000057W_{сол}^2 - \\
& - 0,00019t_{суш}W_{сол} - 5.383
\end{aligned} \quad (5)$$

где E - экстрактивность, %; K - число Кольбаха, %; $C_{ред}$ - содержание редуцирующих сахаров, г/100г сухого вещества; $\tau_{оц}$ - время осахаривания, мин.; $t_{суш}$ - температура сушения, °C; $W_{сол}$ - влагосодержание солода, %;

Решение уравнения регрессии приведены на рис. 1, из которого видно, что при росте температуры сушения и числа Кольбаха экстрактивность увеличивается и соответственно выход экстракта из солода увеличится, что приводит к повышению производительности участка.

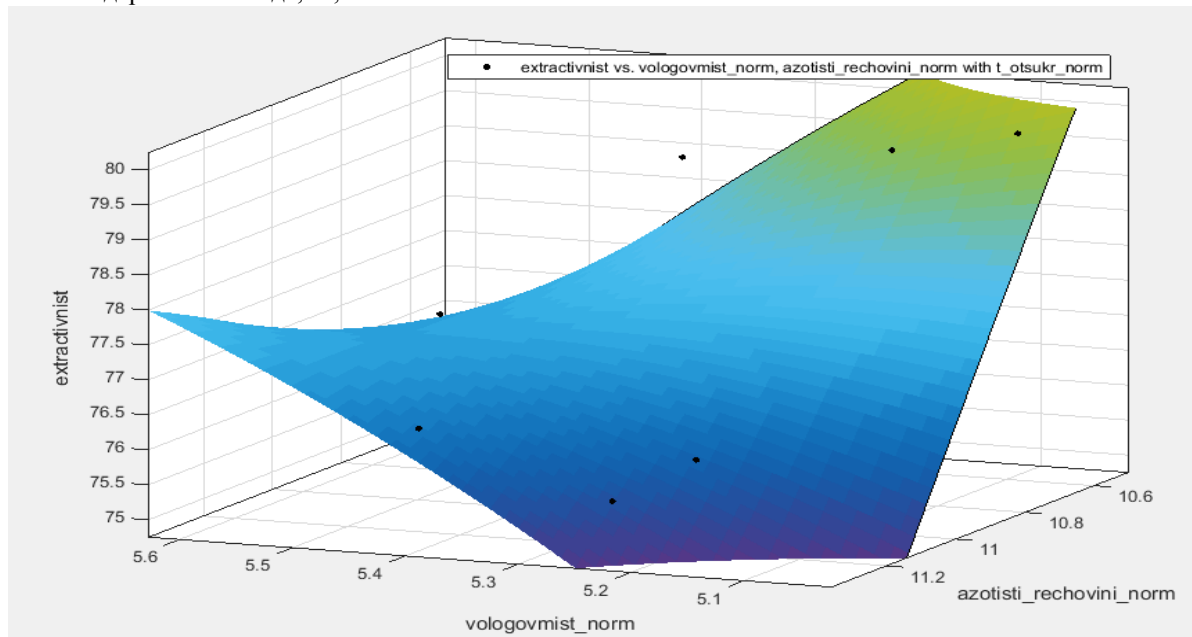


Рис. 1. Изменение экстрактивности товарного солода при нечетких значениях переменных число Кольбаха "высокое", содержание редуцирующих сахаров "норма", время осахаривания "норма" влагосодержание солода "норма", содержание азотистых веществ "норма", температура сушения "высокая".

Модель производительности процесса **получения товарного солода.**

Изменение параметра нечеткого понятия выход экстракта "высокий" при содержании экстракта

$$\begin{aligned}
Вих_{экстр}(Вм_{экстр}, t_{суш}, K_{заг}, C_{ред}) = & 0,355638Вм_{экстр} + 1,942362t_{суш} - 0,12312K_{заг} - \\
& - 4,75976C_{ред} - 0,01066Вм_{экстр}^2 - 0,05824t_{суш}^2 - 0,01803Вм_{экстр}t_{суш} + \\
& + 0,000508Вм_{экстр}K_{заг} + 0,019646Вм_{экстр}C_{ред} + 0,002776t_{суш}K_{заг} + 0,1073t_{суш}C_{ред} - \\
& - 0,00099K_{заг}^2 - 0,03825C_{ред}^2 - 0,00193K_{заг}C_{ред} + 63,24
\end{aligned} \quad (6)$$

где $Вих_{экстр}$ - выход экстракта, %; $Вм_{экстр}$ - содержание экстракта, %; $t_{суш}$ - температура сушения, °C; $K_{заг}$ - общая кислотность, см³ раствора NaOH конц. 1 моль/дм³ в 100см³ сула; $C_{ред}$ - содержание редуцирующих сахаров, г/100г сухого вещества;

та "меньше нормы", температура сушения "норма", общая кислотность "выше нормы", содержание редуцирующих сахаров "выше нормы" происходит по модели вида:

Решение данного полинома показано на рис.2, из которого очевидно, что при содержанию экстракта "меньше нормы", и значениях температуры сушения "норма", общей кислотности "выше нормы", содержания редуцирующих сахаров "выше нормы", мы сможем получить выход экстракта в пределах нормы.

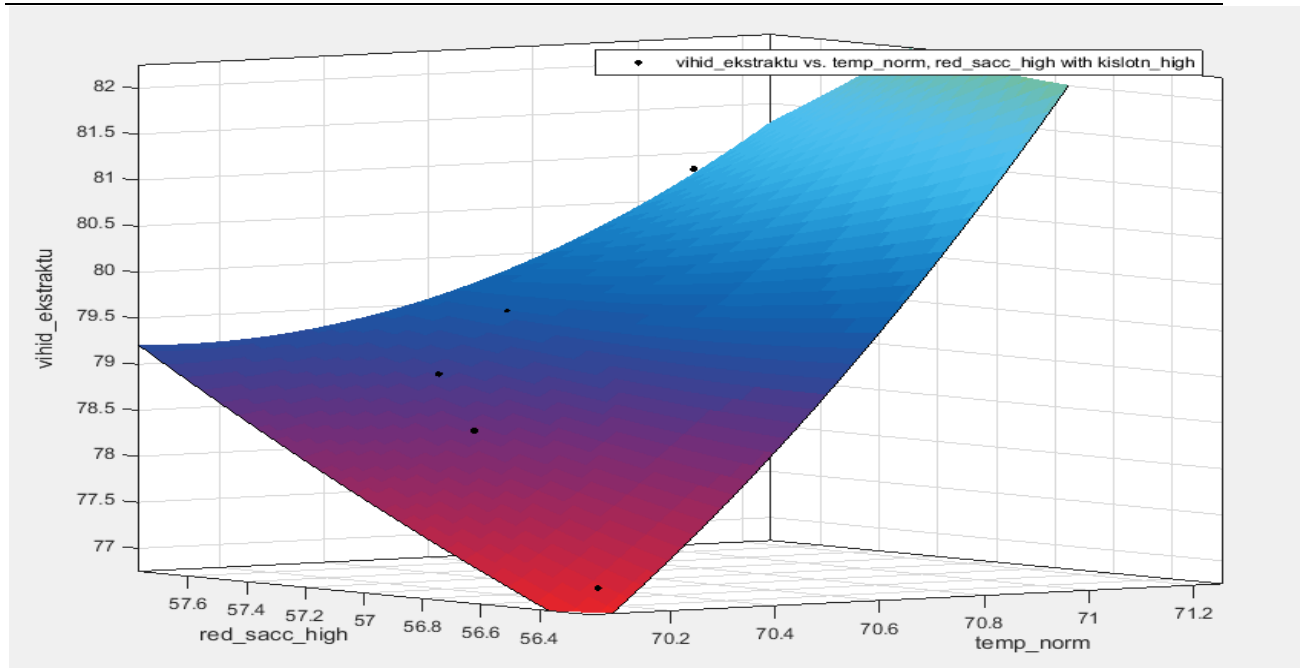


Рис. 2. Изменение выхода экстракта при значениях нечетких переменных содержание экстракта "меньше нормы", температура сушения "норма", общая кислотность "выше нормы", содержание редуцирующих сахаров "выше нормы"

Модель потерь процесса **получения товарного солода**.

Для ситуационно-значимой зоны, в которой потери редуцирующих сахаров "низкие", температура сушки "низкая", число Кольбаха "высокое"

$$\begin{aligned}
 Vmp_{e.p.}(Vmp_{ред}, t_{суш}, K) = & 4,304 Vmp_{ред} + 0,6902 t_{суш} + 0,389 K - 2,89 Vmp_{ред}^2 + \\
 & + 0,127096 Vmp_{ред} t_{суш} + 0,0716 Vmp_{ред} K - 0,0175 t_{суш} - 0,0098 K - 0,0056 t_{суш}^2 - \\
 & - 0,0128 K^2 - 21,33
 \end{aligned} \quad (7)$$

$Vmp_{e.p.}$ - потери экстрактивных веществ при производстве солода, %; $Vmp_{ред}$ - потери редуци-

получена модель, которая соответствует области изменения параметра нечеткого понятия "Потери экстрактивных веществ при производстве солода" "низкие" вида:

рующих сахаров, %; $t_{суш}$ - температура сушения, °С; K - число Кольбаха, %.

Решение данного полинома приведено на рис.3.

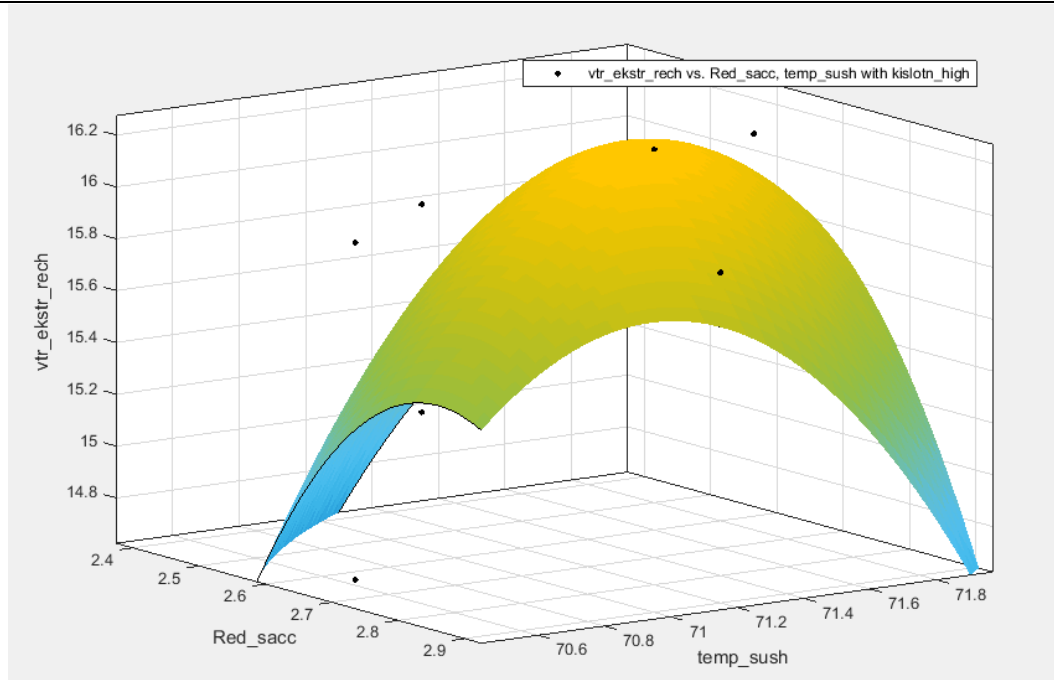


Рис. 3. Изменение потерь экстрактивных веществ при производстве солода при нечетких значениях входных факторов потери редуцирующих сахаров "низкие", температура сушения "низкая", число Кольбаха "высокое".

Разработанные математические модели для различных ситуационно-значимых зон основных технологических процессов пивоварения (затираание, варка сусла с хмелем, брожение и дображивание).

При построении математической модели, которая адекватно описывает технологический процесс, очень важен анализ правильности ее спецификации.

Негативно на свойствах модели обозначается как отсутствие значимой переменной, так и чрезмерное присутствие незначимой.

В случае, когда в модель не включена существенная переменная, наблюдаются следующие последствия:

1. Исчезает возможность правильной оценки и интерпретации уравнений.
2. Оставшиеся коэффициенты при переменных становятся смещенными.
3. Стандартные ошибки коэффициентов и t -статистики некорректны и не могут быть использованы для оценки качества созданной модели.

Например, если модель имеет вид $Y_i = \alpha + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \varepsilon_i$ и из нее изъять переменную X_2 , то в новой спецификации фактически будем рассматривать модель $Y_i = \alpha + \beta X_{1i} + u_i$, где $u_i = \beta_2 X_{2i} + \varepsilon_i$. Если переменные X_1 и X_2 коррелированы, то нарушается предпосылка теоремы Гаусса-Маркова о некоррелированности случайного члена и регрессоров, так как в этом случае между X_1 и u существует ненулевая корреляция. Оценки, полученные по методу наименьших квадратов для данной модели, уже не эффективны среди линейных оценок. Оценки являются даже смещенными, поскольку для метода наименьших

квадратов оценка коэффициента β_1 примет вид

$$\beta_1 = \beta_1 + \beta_2 \frac{Cov(X_1, X_2)}{Var(X_1)}, \quad \text{где присутствует}$$

$$\text{смещение } \beta_2 \frac{Cov(X_1, X_2)}{Var(X_1)}.$$

При включении несущественной переменной в модель смещение оценок коэффициентов не происходит, но появляется другой недостаток - растут стандартные ошибки коэффициентов. Оценки становятся статистически незначимыми. Если точная спецификация модели неизвестна (что практически всегда и бывает), то используют критерии, позволяющие выбрать из некоторого множества моделей лучшую.

Наиболее распространенными критериями являются критерий Шварца (Schwarz) и критерий Акаике (Akaike), которые позволяют выбрать лучшую модель из множества различных спецификаций. Критерии численно построены так, чтобы учесть влияние на качество подгонки модели двух противоположных тенденций. При увеличении числа переменных в модели адекватность модели в общем случае увеличивается. Причем, число регрессоров должно быть разумным, чтобы не вызвать "искусственной подгонки" зависимой переменной поясняющими. С другой стороны, недостаточное включение переменных в модель дает большую стандартную ошибку, и качество подгонки снижается.

Формулы для расчета критериев Akaike и Schwarz записываются:

$$AIC = \ln(\hat{\sigma}^2) + \frac{2s}{n} \quad (8)$$

$$SC = \ln(\hat{\sigma}^2) + \frac{s \ln n}{n} \quad (9)$$

где $\hat{\sigma}^2$ - выборочная дисперсия; s - число ограниченных степеней свободы, n - длина выборки данных.

Значение s в данном случае равно числу независимых переменных в уравнении, включая свободный член. Первое слагаемое в обеих формулах - штраф за большую дисперсию, второй - штраф за использование дополнительных переменных. Критерии рассчитываются для каждой спецификации, которая рассматривается, и предпочтение отдается той модели, где значения критериев меньше.

Кроме названных выше критериев структурной идентификации (структурной адекватности) регрессионных моделей используют также [8]:

1. Коэффициент детерминизации свидетельствует о плотности взаимодействия между факторами и результирующей переменной и определяется:

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{SST} \quad (10)$$

где

$$RSS = \sum_{i=1}^n (y - \hat{y}_i)^2$$

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2$$

y_i - данные измерений; \hat{y}_i - данные, полученные в результате прогнозирования с помощью модели; \bar{y}_i - усредненное значение данных.

2. *Скорректированный коэффициент детерминизации:*

$$R_k^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n}{n - s} \quad (11)$$

3. *Критерий «предсказания» квадратичной погрешности:*

$$PSE(s) = \frac{1}{n} RSS + \frac{2}{n} \hat{\sigma}^2 \quad (13)$$

4. *Статистика Хокинга:*

$$S_s = \frac{RSS}{(n - s)(n - s + 1)} \quad (14)$$

5. *AEF критерий средней оцененной дисперсии:*

$$I_s = \frac{RSS}{n - \sqrt{s(\ln(\frac{n}{s}) + 1) \ln 3}} \quad (15)$$

где 3 - «уровень доверия», который показывает с вероятностью 1-3 значения I_s дает оценку среднего риска.

6. *Статистика Фишера* указывает на силу взаимосвязи между зависимой переменной и независимыми:

$$F(S) = \frac{n}{n - s} \frac{RSS}{\|y - \hat{y}\|^2} \quad (16)$$

Была проведена оценка разработанных моделей-конкурентов определенных структур и параметров этих моделей на основе критериев: детерминации, информационного критерия Акаике, статистик Хокинга и Фишера (табл.2.6).

Таблица 1

Критерии адекватности математических моделей.

Созданная модель	Критерии			
	R^2	AIC	S_s	$F(s)$
Модель (1)	0,31	5,43	0,27	4,48
Модель (2)	0,29	4,36	0,24	4,26
Модель (3)	0,35	5,32	0,31	4,52

Относительная приведенная погрешность прогноза по разработанным моделям не превышала 5,5%.

Выводы

Проведен пассивный эксперимент на всех стадиях приготовления пива и осуществлена идентификация сетевых математических моделей в ситуационно-значимых зонах.

Полученные результаты могут быть использованы в процессе проектирования, разработки и внедрения новых и модернизации существующих систем автоматизации технологических объектов в пищевой промышленности, а также при проектировании систем диагностирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Романова З. М. Дослідження впливу постійного магнітного поля на інтенсифікацію процесу приготування пивного суслу / З. М. Рома-

нова, В. С. Зубченко, М. В. Карпутіна, М. С. Романов // Харчова і переробна промисловість. – 2005. – № 11. – С. 21-22.

2. Юдицкий С.А. Временной анализ систем с сетечентрическим управлением на основе непрерывно-дискретной модели / Юдицкий С.А., Точ Д.С. // Управление большими системами. – 2010. – С. 67-78.

3. Затуливетер Ю. С. Графодинамические системы с сетечентрическим управлением в математически однородном поле компьютерной информации / Затуливетер Ю. С., Фищенко Е. А. // Управление большими системами. – 2010. – 30.1 – С. 567-604.

4. Кульба В. В. Сценарное исследование сложных систем: анализ методов группового управления / Кульба В. В., Кононов Д. А., Чернов И. В., Рошин П. Е., Шулигина О. А // Управление большими системами. – 2010. – 30.1 – С. 154-186.

5. Кулинич А. А. Методология когнитивного

моделирования сложных плохо определенных ситуаций / А. А. Кулинич // Избранные труды второй международной конференции по проблемам управления, 17-19 июня 2003 г. – М. : ИПУ РАН, 2003 г. – С. 219-226.

6. Алтунин А. Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: Монография / А. Е. Алтунин, М. В. Семухин. – Тюмень : Издательство Тюменского государственного университета, 2000. – 352 с.

7. Томашевский В. М. Моделирование систем / В. М. Томашевский. – К. : Видавничка група BNV, 2007. – 352 с.: іл.

8. Дилигенский Н. В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология: Монография / Н. В. Дилигенский, Л. Г. Дымова, П. В. Севастьянов. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 336 с.

MODELING OF THE PROCESS OF ELECTROMAGNETIC WAVE TRANSFER INTO THE COAXIAL WAVE CABLE THROUGH THE HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTING ELEMENT FROM THE WAVEGUIDE

Фу́к А.

Candidate of engineering sciences, associate professor, National Academy National Guardia of Ukraine

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ИЗ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА В КОАКСИАЛЬНЫЙ КАБЕЛЬ ЧЕРЕЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ЭЛЕМЕНТ

Фу́к А.И.

кандидат технических наук, доцент, доцент Национальной Академии Национальной гвардии Украины г.Харьков, Украина

Abstract

The paper presents the results of the simulation of the penetration process into a coaxial cable of an electromagnetic wave through a high-temperature superconductor, which is located in the center of a wide wall of a rectangular waveguide.

Аннотация

В статье представлены результаты моделирования процесса проникновения в коаксиальный кабель электромагнитной волны через высокотемпературный сверхпроводник, который расположен в центре широкой стенки прямоугольного волновода.

Keywords: high temperature superconductor (HTS); waveguide.

Ключевые слова: высокотемпературный сверхпроводник (ВТСП); волновод.

Постановка проблемы.

В современных радиотехнических систем (РТС) все чаще стали использовать сверхчувствительные полупроводниковые и сверхпроводящие элементы (антенны, элементы памяти), которые изготавливаются с использованием методов интегральной технологии, что позволяет существенно уменьшить габариты, вес и стоимость радиоэлементов устройств [1,2]. А использование сверхпроводящих материалов для СВЧ-систем (волноводы, резонаторы, антенны и т.д.) позволило: уменьшить потери энергии, передаваемой (за счет уменьшения на три-четыре порядка сопротивления по сравнению с другими материалам), увеличить добротность резонансных элементов, получить возможности управления в скоростных системах перенастройки (фазовращатели, коммутаторы, электромагнитные защитные устройства и прочее.). Поэтому значительный интерес к разработке математических моделей таких сверхпроводящих элементов по настоящее время не утихает [3]. Для изучения распространения электромагнитной волны в волновом с учетом включения высокотемпературного сверхпровод-

ника необходимо разработать математический аппарат расчета ее компонент, используя теорию электромагнитного поля и теорию сверхпроводимости[4]

Обзор последних исследований и публикаций.

В настоящее время разработано множество математических моделей (в том числе программ (CSC, MW Office и другие), описывающих с разной степенью точности электромагнитные поля в различных волноводных системах [5]. Однако, они не позволяют учитывать использование микрополосковых элементов (МПЭ) произвольной структуры из высокотемпературного сверхпроводящего материала, потому что, все электромагнитные теории высокотемпературных сверхпроводников является эмпирическими. Эти теории высокотемпературной сверхпроводимости используются при известных ограничениях (тип сверхпроводника (Монокристаллы или пленка разной толщины), параметры электромагнитной волны, передаваемой (частота, мощность), наличие системы охлаждения и прочее.